

УДК 502/504 : 627.8 : 624.042.7

**В. С. БОРТКЕВИЧ**

ОАО «Институт МосводоканалНИИпроект»

**А. С. ЖЕРИХИН**

ЗАО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ»

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СТРОЯЩИХСЯ ВЫСОКИХ КАМЕННО-ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН

*Рассмотрены способы повышения сейсмостойкости высоких каменно-земляных плотин в процессе строительства. Регулирование гранулометрического состава и улучшение качества уплотнения крупнозернистых грунтов в теле плотин позволяют устранить возможность возникновения опасных деформаций и порового давления воды, а также максимально использовать свойство дилатансии разнородных грунтов. Создание геокомпозитов путем ярусной закладки арматуры или высокопрочного тканого геотекстиля позволяет исключить местные нарушения и накопление пластических деформаций в теле плотины от землетрясения. Анализируется вопрос расчета устойчивости откосов и сейсмостойкости плотин по нормативным документам. Приводятся результаты расчета устойчивости откосов плотины высотой 335 м в условиях расчетного сейсмического воздействия 9 баллов. Рассматривается применение тканого геотекстиля Stabilenka®. Приведены конструктивные схемы различных способов повышения сейсмостойкости высоких каменно-земляных плотин.*

*Высокая каменно-земляная плотина, технологические возможности, сейсмостойкость, пластические деформации, крупнозернистый грунт, геокомпозит, плотность грунта, арматура, тканый геотекстиль.*

*There are considered methods of improving earthquake stability of high earth-and-rockfill dams in the process of construction. Regulation of the granulometric composition and quality improvement of coarse-grained soils hardening in the dam body allows eliminating a possibility of arising of dangerous deformations and threshold water pressure as well as using as most as possible a property of dilatency of anisomereous soils. Creation of geocomposites by means of tier armature laying or high-strength woven geotextile makes it possible to exclude local breakages and accumulation of plastic deformations in the dam body from earthquake. There is analyzed a question of slopes stability calculation and dams earthquake stability according to the normative documents. The results of calculation of dam slopes stability of height 335 m under the conditions of rated seismic action 9 balls are given. There is considered usage of woven geotextile Stabilenka®. There are given construction diagrams of different methods of improving earthquake resistance of high earth-and-rockfill dams.*

*High earth-and-rockfill dam, technological possibilities, seismic stability, plastic deformations, geocomposite, soil density, armature, woven geotextile.*

Высокие каменно-земляные плотины, включающие ядро из скелетно-глинистых грунтов и боковые призмы из крупнозернистых (крупнообломочных) грунтов, обычно возводят на скальном основании в сейсмически активных районах со сложными инженерно-геологическими условиями строительства. Это объясняется относительно малой деформируемостью

материалов тела плотин и возможностью выполнения надёжного сопряжения их ядер, являющихся противофильтрационными устройствами, сбортами вмещающих скальных массивов. К таким сооружениям относятся построенные с участием российских специалистов Нурекская плотина высотой 304 м в Таджикистане, Тери высотой 261 м в Индии, а также

строящиеся в Таджикистане Рогунская ГЭС высотой 335 м и ГЭС Shuangjiangkou на реке Даду высотой 312 м в Китае.

Расчеты устойчивости откосов описаны в СНиП 2.06.05–84\* «Плотины из грунтовых материалов» и СНиП II–7–81\* «Строительство в сейсмических районах». Кроме этого сейсмостойкость высоких плотин обосновывается в России большим объемом расчетных исследований напряженно-деформированного состояния при различных способах задания сейсмического воздействия на сооружения и разных математических моделях поведения грунтов [1, 2, 3].

Обычно выполняемый комплекс расчетных исследований позволяет установить, что при интенсивном сейсмическом воздействии в теле высокой плотины могут возникать зоны с прогрессирующим накоплением пластических деформаций, по которым формируются нарушения монолитности тела плотины и поверхности обрушения ее откосов. Расчетными исследованиями определены места появления таких опасных зон при действии разрушительных землетрясений. Они располагаются у пригребневой зоны откосов плотины в средней части верховой боковой призмы. Степень приближения к критическому состоянию тела плотины в этих зонах при сейсмическом воздействии пока однозначно не определяется.

Следует отметить, что в настоящее время строительство высоких каменно-земляных плотин осуществляется в условиях общего повышения сейсмической активности в мире и в более сложных инженерно-геологических условиях по сравнению с ранее возведенными сооружениями [4]. В неоднородных скальных основаниях этих сооружений имеются разломы и трещины различного порядка, а в некоторых из них наблюдаются тектонические подвижки. Измерения напряжений в массиве скальных пород зачастую показывают их значительную величину, причём горизонтальные напряжения могут превышать вертикальные.

Необходимо учитывать, что сложность строения такого природного массива горных пород не позволяет выявить все без исключения «дефекты» основания, на котором строится и будет эксплуатироваться плотина, даже при самых деталь-

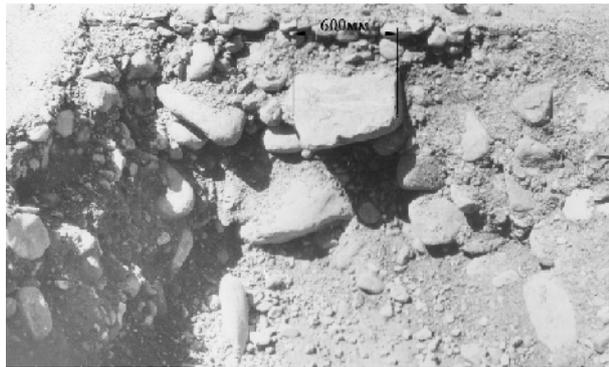
ных современных инженерно-геологических исследованиях. Поэтому в оценке инженерно-геологических условий объекта и в прогнозах их изменения под влиянием техногенных факторов всегда присутствует некоторый элемент неопределенности [5].

Вышеуказанные особенности инженерно-геологического строения оснований высоких каменно-земляных плотин и вероятность проявления тектонических подвижек в бортах вмещающих скальных массивов при землетрясениях пока не нашли отражение ни в одной методике расчетных исследований напряженно-деформированного состояния и сейсмостойкости плотин.

Технологическими исследованиями по укладке гравийно-галечниковых грунтов в боковые призмы строящейся плотины Рогунской ГЭС установлено, что структура сложения насыпей из натуральных грунтов существенно отличается от структуры сложения модельных смесей, для которых в лабораторных условиях определены и использованы в расчетах связи между напряжениями и деформациями [6]. Модельные смеси готовились из условия ограничения крупности и равномерного смешивания фракций грунта. В реальных условиях при возведении боковых призм из гравийно-галечниковых грунтов равномерного смешивания фракций не происходит. Вследствие большой разнородности гранулометрического состава  $C_u = 200...400$ ) образуется матричная структура массива. Элементами структуры являются: матрица из фракций размером до 40...80 мм, называемая «основой», со значительно большим содержанием мелкозема (частиц мельче 5 мм), чем в отсыпаемом грунте; включения гнезд валунов размером до 600...800 мм, называемые «скоплениями», неравномерно распределенные по объему насыпей и практически не содержащие мелкозема. Объем единичных «скоплений» валунов достигает 1,5 м<sup>3</sup>, а общий – 15...50% в зависимости от гранулометрического состава отсыпаемого грунта. На рис. 1 показан фрагмент поверхности опытной насыпи в теле плотины Рогунской ГЭС и стенка шурфа со «скоплением» валунов.



а

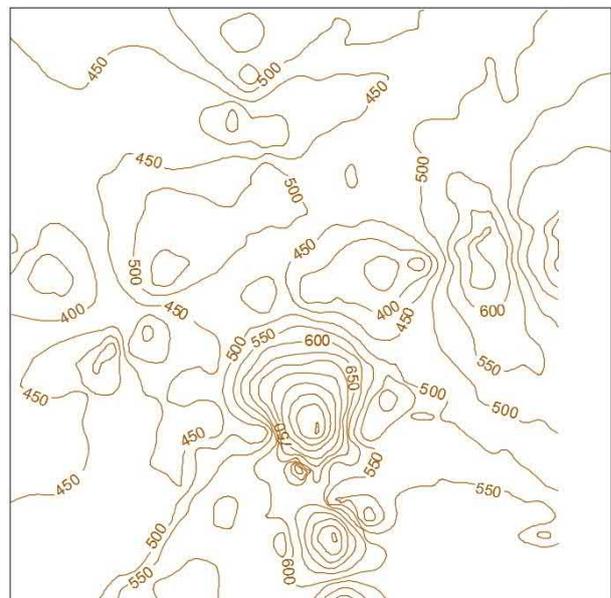


б

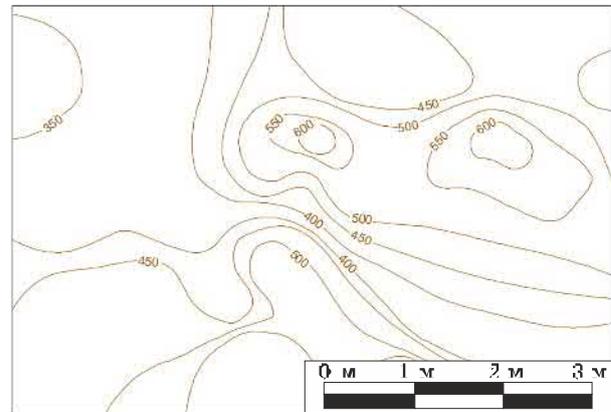
Рис. 1. Опытная насыпь из гравийно-галечникового грунта в теле плотины Рогунской ГЭС: а – фрагмент поверхности насыпи; б – стенка шурфа для определения плотности

На рис. 2 приведены карты распространения скоростей продольных упругих волн в опытных насыпях по результатам сейсмоакустической томографии. Наблюдаемая неравномерность распределения скоростей упругих волн соответствует неравномерности распределения физико-механических характеристик грунта в теле насыпей. Плотность сухого грунта в боковых призмах плотины составляет 2,0...2,4 т/м<sup>3</sup>.

Основными способами повышения сейсмостойкости массива из крупнозернистых грунтов являются регулирование гранулометрического состава и качественное уплотнение грунтов, которые позволяют устранить возможность возникновения опасных деформаций и порового давления воды, а также максимально использовать свойство дилатансииразнозернистых грунтов для повышения прочности массива при сейсмическом воздействии. Исследованиями процессов динамического уплотнения гравийно-галечниковых грунтов было установлено, что коэффициент уплотнения  $K_{com} \geq 0,97$  [7].



а



б

Рис. 2. Карты распределения скоростей продольных упругих волн в опытных насыпях № 1 (а) и № 2 (б) из гравийно-галечниковых грунтов: 350...500 – изолинии скоростей, м/с

Такое уплотнение обеспечивает получение устойчивой структуры грунта и гарантирует сохранение этой структуры в условиях динамических воздействий на сооружение. В СНиП 2.06.05–84\* «Плотины из грунтовых материалов» и в СНиП II–7–81\* «Строительство в сейсмических районах» не нормируется величина коэффициента уплотнения грунтов в теле плотин. Не приводится каких-либо сведений по коэффициенту уплотнения грунтов в сооружениях и при составлении для них деклараций безопасности. До настоящего времени в России не разработан государственный стандарт для определения максимальной плотности крупнозернистых грунтов, знание которой необходимо при

определении коэффициента уплотнения по следующей формуле:

$$K_{\text{com}} = \rho_d / \rho_d^{\text{max}}, \quad (1)$$

где  $\rho_d$  – плотность сухого грунта в теле сооружения;  $\rho_d^{\text{max}}$  – максимальная плотность грунта по результатам испытаний.

В этих условиях следует учитывать возможность нарушения монолитности тела высокой плотины и снижения устойчивости откосов при сейсмических воздействиях вследствие адаптации сооружения к вмещающей среде и действующим нагрузкам, а также возможность накопления остаточных деформаций и повреждений, в том числе и тех, которые происходят при относительно слабых землетрясениях в процессе заполнения водохранилища и эксплуатации сооружения.

Известны способы повышения сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов при конструктивном разбиении их тела на блоки из грунтов с разным отношением модуля Юнга к плотности, препятствующие возникновению резонансного режима колебаний сооружения [8, 9]. Однако эти способы трудновыполнимы в практике строительства.

Исключить местные нарушения и накопление пластических деформаций в теле плотины от сейсмических воздействий возможно введением в крупнозернистый грунт боковых призм искусственных материалов, способных воспринимать растягивающие усилия, т. е. созданием геокомпозитов. К таким технологическим приемам относится укрепление каменно-земляной плотины по авторскому свидетельству № 1717710 [10]. Этот прием включает закладку в плотину перфорированных на отдельных участках труб и омоноличивание через них крупнозернистого грунта инъекцией связующего раствора. Сварные плети труб закладываются горизонтально в боковые призмы по направлению от откосов к ядру при послойном возведении плотины. Концы труб, выходящие на откосы плотины, подключают к системе нагнетания связующего раствора, приготовленного на основе цемента, жидкого стекла и т.п. По окончании возведения плотины или ее части производят нагнетание связующего раствора в трубы, через перфорацию которых омоноличивается крупнозернистый грунт боковых призм. Омоноличенные зоны крупнозернистого грунта могут располагаться в теле плотины в шахматном порядке с шагом, от величины которого зависит общее сцепление грунта

по массиву. Повышение сцепления трубчатой арматуры с грунтом и общего сцепления грунта по массиву при сохранении его водопроницаемости позволяет увеличить крутизну откосов плотины и повысить сейсмостойкость сооружения. Длина труб, укладываемых в направлении от поверхности откосов плотины к ее ядру, обусловлена положением границ между оползающим и неподвижным грунтом в неукрепленном массиве при критической величине сейсмического воздействия. Для определения количества труб, их расположения и поперечного сечения могут быть использованы ранее указанные методы расчета напряженно-деформированного состояния плотин или программа расчета откосов плотин из упрочненного гравийно-галечникового грунта [11].

К технологическим приемам, повышающим сейсмостойкость плотин относится и способ возведения земляного сооружения по авторскому свидетельству № 2055118, который заключается в том, что при отсыпке каждого слоя грунта производят укладку в него отдельными зонами равномерно по слою твердеющего консистентного материала и арматуры. Твердеющий консистентный материал укладывают на отдельных участках арматуры (многоточечная анкеровка) [12]. Арматуру располагают в теле боковых призм плотны также, как в ранее описанном способе. Твердеющий консистентный материал (раствор) подают к месту укладки автотранспортом, разравнивают и уплотняют в процессе проведения аналогичных работ на слое отсыпки грунта. Эти способы позволяют создать в теле плотины геокомпозит, состоящий из крупнозернистого грунта, включений консистентного твердеющего материала (связующего раствора) и заделанных в них арматурных ветвей. В таком геокомпозите усилия на арматуру передаются посредством заделки ее в твердеющий материал, а не посредством контакта с грунтом, как это должно иметь место в армированном грунте и может быть осуществлено только в грунтах ограниченной крупности со специально подобранным гранулометрическим составом. Укрепленная зона плотины может воспринимать значительные напряжения без образования трещин.

Результаты расчета устойчивости откосов плотины высотой 335 м с учетом возведения ее по способу, предложенному авторским свидетельством № 2055118, в условиях расчетного сейсмического воздействия 9 баллов и при наихудшем распределении

пиковых горизонтальных ускорений по высоте плотины (с максимальным значением на гребне) показали возможность замены рваного камня пригрузки боковых призм плотины на упрочненный гравийно-галечниковый грунт без уменьшения крутизны откосов [13]. Величины усилий в арматуре, количество арматуры на 1 м высоты и длины плотины для стали марок Ст3 и А11, обеспечивающее значения коэффициентов запаса устойчивости обоих откосов равными 1,185, приведены в таблице.

Откос	Усилие в арматуре на 1 м высоты слоя, кН	Площадь сечения арматуры	
		Сталь Ст3 ( $R = 2100 \text{ кг/см}^2$ ), $\text{см}^2$	Сталь А-11 ( $R = 5170 \text{ кг/см}^2$ ), $\text{см}^2$
Верховой	176	8,4	3,4
Низовой	60	2,9	1,2

Для восприятия таких усилий в создаваемом геокомпозите могут применяться вместо арматуры и более современные искусственные материалы, например, такие, как полотнища (решетки) тканого геотекстиля Stablenka®. В случае применения тканого геотекстиля не требуется укладывать в гравийно-галечниковый грунт твердеющий консистентный материал.

В качестве примера использования армирующих элементов из тканого геотекстиля для упрочнения откосов высокой каменно-земляной плотины можно привести плотину ГЭС Shuangjiangkou в Китае, поперечный профиль которой показан на рис. 3 [14].

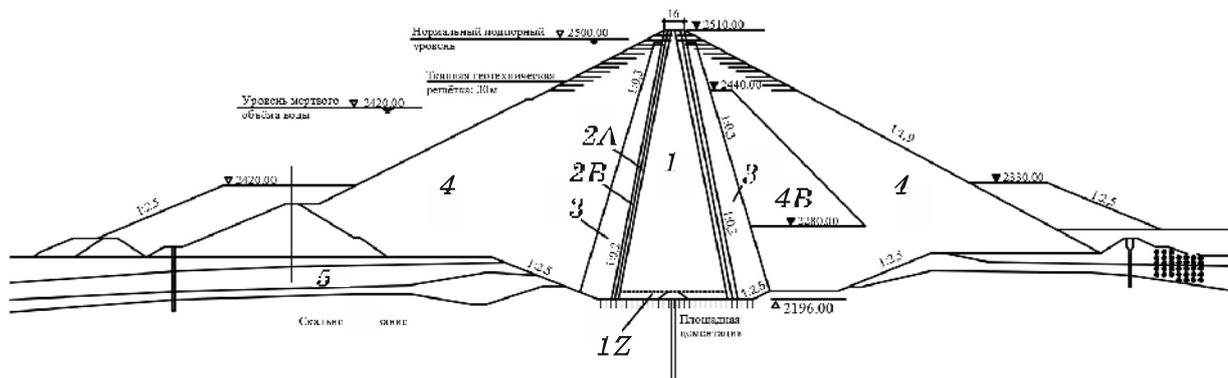


Рис. 3. Поперечный профиль плотины ГЭС Shuangjiangkou: 1 – ядро из водонепроницаемого гравелистого грунта; 1Z – контактный слой из глины; 2A – фильтр А; 2B – фильтр В; 3 – переходная зона; 4 – боковые призмы из уплотненной каменной наброски; 4B – внутренняя зона уплотненного мелкого камня; 5 – пригруженное основание, состоящее из трех слоев грунта различной консистенции

Тканый геотекстиль Stablenka® представляет собой ткань из полиэстера в продольном направлении (основа) и полиамида или полиэстера в поперечном направлении. Материал обладает долговечностью, высокой прочностью при растяжении, выдерживает большие растягивающие усилия при незначительном удлинении и эффективен при необходимости армирования грунта с небольшими допустимыми деформациями. Существует несколько стандартных типов материала с различными значениями прочности 150...1000 кН/м при растяжении [15].

Тканый геотекстиль Stablenka®, выпускаемый германской фирмой HUESKER SyntheticGmbH&Co, широко опробован в мировой практике при строительстве и эксплуатации крупных мор-

ских гидротехнических сооружений, а также при строительстве дорожных насыпей на слабых грунтах в России.

В перспективе возможно появление аналогичного материала отечественного производства при реализации отраслевой программы внедрения композиционных материалов, конструкций и изделий из них в строительном комплексе Российской Федерации, утвержденной приказом Министерства регионального развития РФ от 24 июля 2013 г. № 306.

Укладка арматуры с многоточечной анкерровкой в грунте или укладка полотнищ (решеток) тканого геотекстиля могут быть применены для создания геокомпозита в потенциально опасных зонах, формирующихся при критических сейсмических воздействиях в теле высокой плотины (рис. 4).

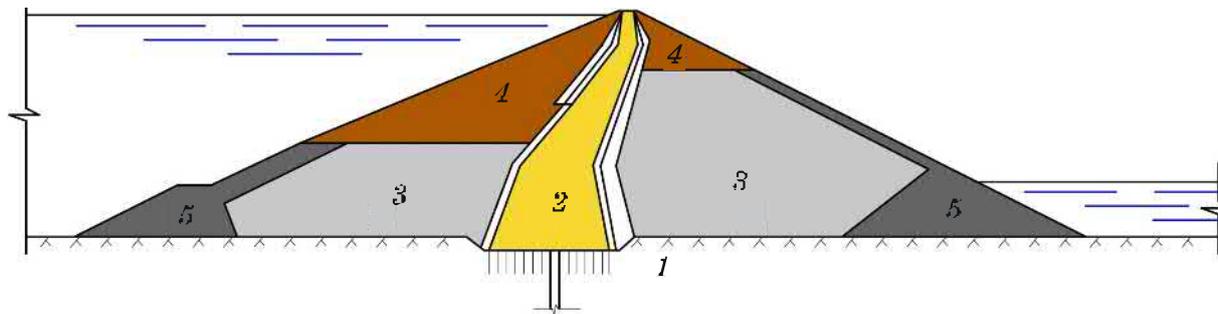


Рис. 4. Вариант повышения сейсмостойкости высокой каменно-земляной плотины: 1 – скальное основание; 2 – скелетно-глинистый грунт; 3 – гравийно-галечниковый грунт; 4 – геокompозит (гравийно-галечниковый грунт, укрепленный арматурой с многочисленной анкерровкой или полотнищами тканного геотекстиля); 5 – каменная наброска

Создание геокompозитов в зонах ожидаемого развития пластических деформаций, которые могут появиться в теле высоких плотин при действии особенно интенсивных землетрясений, позволит компенсировать влияние отрицательных природных факторов, не выявленных в процессе изысканий и неучтенных расчетными исследованиями сейсмостойкости плотин, что существенно повысит надежность этих ответственных сооружений.

#### Выводы

Высокие каменно-земляные плотины строятся в сложных инженерно-геологических условиях, не позволяющих полностью выявить все факторы отрицательного воздействия вмещающей природной среды на сооружение и особенности поведения слагающих его грунтов при землетрясениях, поэтому в качестве предупреждающей меры следует считать полезным профилактическое повышение их сейсмостойкости известными в настоящее время и относительно простыми в исполнении технологическими приемами строительства.

Регулирование гранулометрического состава и качественное уплотнение грунтов являются основными способами повышения сейсмостойкости массива из крупнозернистых грунтов в теле плотины.

Повышение сейсмостойкости плотины может быть достигнуто применением геокompозитов в зонах вероятного развития пластических деформаций от сейсмических воздействий. Расположение этих зон определяется расчетом напряженно-деформированного состояния плотины при критических расчетных сейсмических нагрузках.

В крупнозернистых грунтах, характеризующихся большой неоднородностью, геокompозиты рекомендуется создавать послойную или ярусную укладку арматуры

и ее многоточечную анкерровку в грунте или укладку полотнищ высокопрочного тканного геотекстиля.

1. Зарецкий Ю. К., Ломбардо В. Н. Статика и динамика грунтовых плотин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

2. Лятхер В. М., Иващенко И. Н. Сейсмостойкость грунтовых плотин. – М.: Наука, 1986. – 278 с.

3. Гольдин А. Л., Рассказов Л. А. Проектирование грунтовых плотин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 303 с.

4. Савич А. И., Бронштейн В. И. Современное состояние и пути обеспечения сейсмостойкости и гидродинамической безопасности крупных энергообъектов // Гидротехническое строительство. – 2000. – № 8/9. – С. 60–70.

5. Парабучев И. А. Об актуальных проблемах инженерных изысканий для гидротехнического строительства // Гидротехническое строительство. – 2003. – № 3. – С. 6–10.

6. Борткевич С. В. Роль технологических исследований в научном обосновании плотин из грунтовых материалов // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 8. – С. 31–35.

7. Борткевич С. В. О плотности укладки песчано-гравийных и галечниковых грунтов в тело плотины // Гидротехническое строительство. – 1982. – № 6. – С. 28–30.

8. Плотина из грунтовых материалов: А. с. 808581 / Я. И. Натариус (СССР). – Оpubл. 1981. – Бюл. № 8. – 3 с.

9. Земляная плотина: А. с. 1301912 / М. Л. Гиленко (СССР). – Оpubл. 1987. – Бюл. № 13. – 2 с.

10. Устройство для укрепления каменно-земляной плотины: А. с. 1717710 /

С. В. Борткевич [и др.]. – Оpubл. 1992. – Бюл. № 9. – 2 с.

11. Программа расчета откосов плотин из упрочненного гравийно-галечникового грунта: Свид. об офиц. рег. пр. для ЭВМ № 980297. – Оpubл. 1998.

12. Способ возведения земляного сооружения: А. с. 2055118 / В. С. Борткевич [и др.]. – Оpubл. 1996. – Бюл. № 6. – 3 с.

13. Разработка способа упрочнения гравийно-галечниковых грунтов в каменно-земляных плотинах / Архиппова Е. К. [и др.] // Гидротехническое строительство. – 1995. – № 1. – С. 18–22.

14. В Китае идет строительство самой высокой плотины в мире [Электронный ресурс]. – URL: [http://blog.rushydro.](http://blog.rushydro.ru/?m=20110720)

ru/?m=20110720 (дата обращения 20.08.2011).

15. Родькин А. П. Геосинтетические материалы для дорожного строительства // Строительные материалы. – 2000. – № 12. – С. 24–28.

Материал поступил в редакцию 28.08.14.

**Борткевич Виктор Станиславович**, заместитель генерального директора, главный инженер

Тел. 8 (495) 956-19-47

E-mail: [bortkevich@muknii.pr.ru](mailto:bortkevich@muknii.pr.ru)

**Жерихин Александр Сергеевич**, главный инженер проекта

Тел. 8-926-354-90-33

E-mail: [zas@gitest.ru](mailto:zas@gitest.ru)

УДК 502/504:627.838

**Ф. Х. АУБАКИРОВА**

Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауэзова

## ГАШЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ ПОТОКА В ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЯХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ

*В статье приведен обзор устройств нижнего бьефа водосбросных гидротехнических сооружений, применяемых для гашения избыточной энергии потока, предотвращения размыва грунта русла и устранения нарушения течения. Показано, что конструкция устройств нижнего бьефа подбирается в зависимости от режима сопряжения и типа грунта русла. Отмечена необходимость таких устройств для обеспечения безаварийной работы водосбросных сооружений. Рассмотрены достоинства и недостатки каждой формы сопряжения бьефов, представлены применяемые конструкции устройств нижнего бьефа, названы их положительные и отрицательные качества, а также области применения. Рассматриваются различные конструктивные решения таких устройств для гашения избыточной энергии в нижнем бьефе, как носок-уступ, ковшовый колодец, шашечный гаситель потока, носок-трамплин и другие.*

*Гашение избыточной энергии потока, водосбросные сооружения, сопряжение бьефов, устройства нижнего бьефа.*

*In the article there is given a survey of the lower pool arrangements of spillway hydraulic structures used for dissipation of excess flow energy, prevention channel soil from erosion and elimination of flow violation. It is shown that the design of the lower pool devices is arranged according to the conditions of conjugation and type of channel soil. There is marked a necessity of such devices for ensuring faultless operation of spillway structures. There are considered the advantages and disadvantages of each form of pools conjugation, presented the applied designs of the lower pool arrangement, named their positive and negative qualities as well as fields of usage. Different structural decisions of such devices are considered for dissipation of excess flow energy in the lower pool such as a deflecting bucket, bucket well, check flow dissipater, ski-jump bucket etc.*

*Dissipation of excess flow energy, spillway structures, conjugation of pools, arrangements of the lower pool.*